

На правах рукописи

**Овчаренко Борис Дмитриевич**

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

01.04.21 – Лазерная физика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Москва – 2018**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении  
науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии  
наук

**Научный руководитель:**

**Гарнов Сергей Владимирович**, д.ф.-м.н.,чл.-корр. РАН, ВРИО директора,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:**

**Ведущая организация:**

Защита состоится XX.XX.201X в XX.XX на заседании диссертационного  
совета X XXX.XXX.XX при ИОФ РАН по адресу: 119991 ГСП-1, г.Москва,  
ул.Вавилова, д.38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке XXX XXX.

Автореферат диссертации разослан « »\_\_\_\_\_ 201X года

Ученый секретарь

Диссертационного совета

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Существующие в данный период времени сведения из различных источников, связанные с разработкой твердотельных лазеров с диодной накачкой или самих квантронов с диодной накачкой (часть лазера – узел накачки активного элемента), дают достаточно широкое, но не полное представление о них. Весь интерес связан с возможностью запасения больших энергий в активном элементе, который, как правило, представляет собой керамический кристалл круглого, квадратного или прямоугольного сечения. Причем, размеры активного элемента могут быть сравнительно небольшими, а запасенная энергия в нем может достигать до нескольких единиц Дж, что соответствует большим погонным коэффициентам усиления активной среды (сотни раз).

Коэффициенты полезного действия в таких диодных лазерах или квантронах достигают больших значений: свет – свет – до 70%, электричество – свет – до 35%. Такая эффективность достигается за счёт правильного математического моделирования общей схемы накачки и эффективного теплоотвода от источников тепловыделений внутри квантрона.

Еще одним интересным фактом является использование в квантронах не только широко известных активных элементов из алюмоиттриевого граната, легированных неодимом, с длиной волны накачки  $\lambda=808$  нм и генерацией  $\lambda =1064$  нм, но и алюмината иттрия или эрбиевого АЭ, которые имеют свою специфику накачки, а также предназначены для особого применения как в научных, так и в военных целях.

## **Цель работы**

Целью диссертационной работы являлась разработка мощных твердотельных квантронов с диодной накачкой и цилиндрическими активными элементами из алюмоиттриевого граната, легированного неодимом  $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , с размером диаметра до 10 мм, для эффективного применения их в лазерных системах с большими энергиями, а также теоретическое и экспериментальное исследование их входных/выходных оптических и энергетических параметров.

## **Основные задачи диссертационной работы**

1. Математическое моделирование общей схемы квантрона, расчет запасенной энергии и оптимизация схемы накачки.
2. Теоретические и экспериментальные исследования влияния геометрических параметров активных элементов на выходные параметры квантронов.
3. Тепло-гидродинамический расчет и оптимизация квантронов с целью эффективной работы на частотах до 100 Гц.
4. Разработка экспериментальных стендов и методик измерений временного профиля коэффициента усиления и распределения люминесценции по сечению активного элемента.

## **Научная новизна**

1. Предложена технология математического моделирования и расчета квантронов с диодной накачкой.
2. Теоретически рассчитаны и экспериментально получены большие погонные коэффициенты усиления слабого сигнала (сотни раз) в кристаллах  $\text{Nd:YAG}$  на диаметрах активных элементов 5 и 10 мм.
3. Экспериментально определены зоны оптимальной накачки активных элементов в зависимости от их геометрии и размеров.

4. Разработаны испытательные стенды и методики измерений для упрощения анализа и проверки выходных оптических и энергетических характеристик квантронов.

#### **Практическая значимость**

В диссертационной работе представлены технологии проектирования и математических расчетов квантронов с диодной накачкой, а также разработаны испытательные стенды и методики измерений их энергетических и оптических параметров. Это позволяет иметь широкое представление о разработке готового прибора для его применения в различных лазерных системах с требуемыми выходными характеристиками.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Увеличение длины зоны накачки при одинаковом размере длины активного элемента и энерговкладе дает увеличение коэффициента усиления в 2 – 3 раза.
2. Изменение размера длины активного элемента при одинаковой зоне накачке и энерговкладе дает увеличение коэффициента усиления на 10 – 15 %.
3. Модификация боковой поверхности активного элемента улучшает распределение люминесценции по сечению активного элемента, а также дает увеличения коэффициента усиления до 30%.

#### **Достоверность**

Достоверность обеспечивается воспроизводимостью полученных результатов на разработанных испытательных стендах, а также при внедрении разработанных квантронов в готовые лазерные системы.

#### **Личный вклад**

Личный вклад соискателя заключался в активном участии во всех этапах разработки квантронов, стендов и методик измерений: от проектирования и математического моделирования, до сборки, проведения

экспериментов на стендах и внедрение разработанных приборов в готовые лазерные системы.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались на X и XI всероссийских школах для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (г. Саров, апрель 2016 и май 2017).

### **Публикации**

На данный момент результаты по теме диссертации уже изложены в 2 научных публикациях не из перечня научных рецензируемых журналов ВАК. Ещё 2 статьи находятся на стадии оформления для научных публикаций в журналах ВАК в ближайшее время. Кроме того, по теме диссертации имеется 1 патент на полезную модель №166589 («Оптическая усилительная головка с диодной накачкой», патентообладатель ИОФ РАН) и ещё 1 патент на полезную модель находится на стадии рассмотрения заявки в федеральной службе по интеллектуальной собственности (ФИПС).

### **Структуры и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет XXX страниц, включая XX рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи, описана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные результаты, выносимые на защиту, а также рассказано об апробации работы и личном вкладе автора.

**В первой главе** диссертационной работы приведены научно-технические и информационные сведения данной проблематики, исходя из современных как отечественных, так и зарубежных исследований.

**Вторая глава** посвящена полностью теоретическому описанию квантронов с импульсной поперечной диодной накачкой и активными элементами Nd:YAG размерами диаметров 5 и 10 мм.

В главе 2.1 произведен расчет запасенной энергии для квантронов с поперечной диодной накачкой и активными элементами Nd:YAG размерами диаметров 5 и 10 мм для получения больших коэффициентов усиления (сотни раз).

В главе 2.2 рассчитана математическая модель квантронов с поперечной диодной накачкой и активными элементами Nd:YAG размерами диаметров 5 и 10 мм в программных пакетах.

В главе 2.3 исследуется влияние геометрических параметров активных элементов Nd:YAG на ожидаемые выходные параметры квантрона (распределение люминесценции по сечению активного элемента и погонный коэффициент усиления).

В главе 2.4 даны рекомендации по оптимизации общей схемы накачки при оптимальных геометрических параметрах активных элементов для получения больших погонных коэффициентов усиления и равномерной засветки всей апертуры активных элементов.

Глава 2.5 содержит в себе расчет возможных тепловыделений при максимальных параметрах накачки квантронов, а также произведен расчет в

программном пакете (рис. 1) для визуализации и последующей оптимизации эффективности теплосъема с источников тепловыделений.

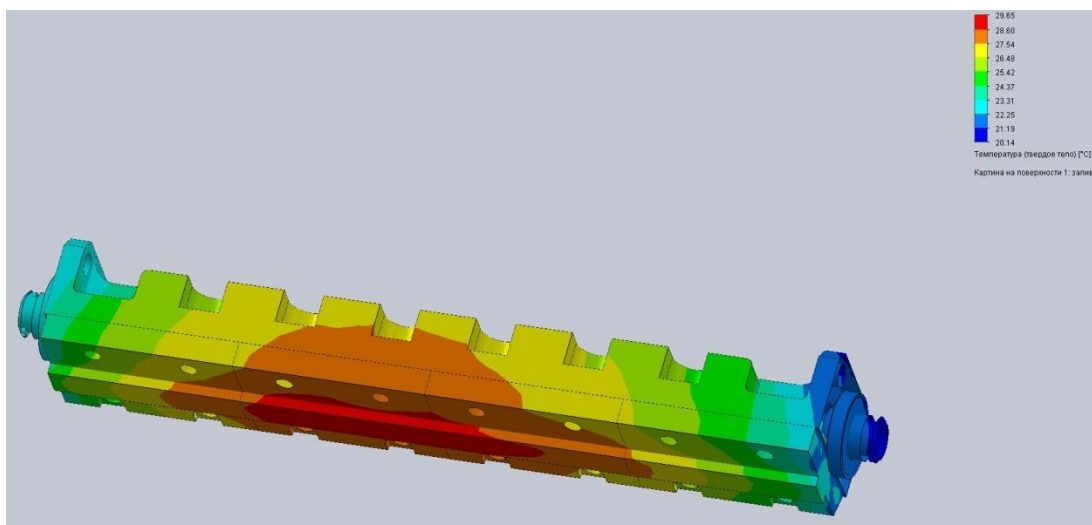


Рис. 1 Распределение градиента температуры в теплообменнике при нагрузке 25 Вт тепла на каждую диодную матрицу квантрона с диаметром активного элемента 10мм.

**В выводах к главе 2** обозначены основные нюансы по оптимизации квантронов с поперечной диодной накачкой при их проектировании и расчете.

В основе **третьей главы** лежит информация о разрабатываемых в ИОФ РАН квантронах с поперечной диодной накачкой (рис. 2 и рис. 3), а также - об испытательном оборудовании и методиках измерений к ним.



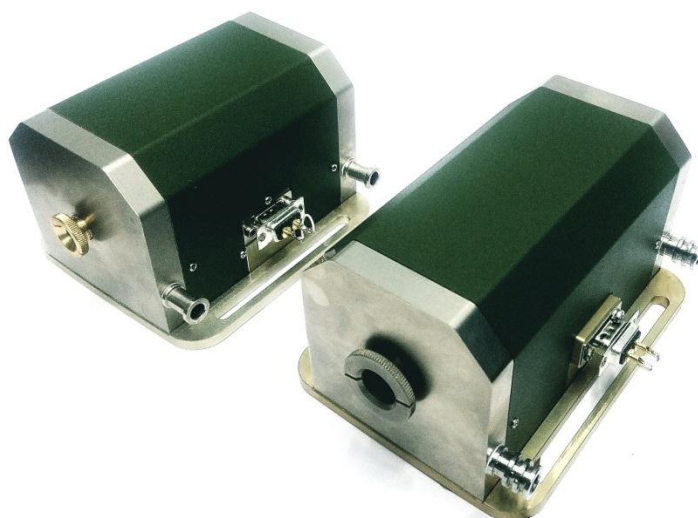


Рис. 2 Общий вид разработанных квантронов с диаметрами активных элементов 5 и 10 мм.

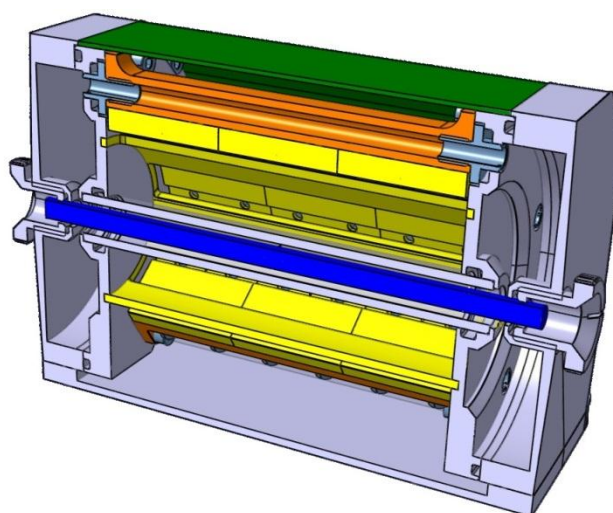


Рис. 3 Продольное сечение на примере разработанного квантрона с диодной накачкой и диаметром активного элемента 5 мм.

В главе 3.1 представлены самые первые и последние разработки с описанием конструкций (рис. 4, рис. 5 и рис. 6) и их основных отличительных черт. Приведена информация об уже зарегистрированных патентах на разработанные в ИОФ РАН квантроны, а также и о заявках на будущие патенты.

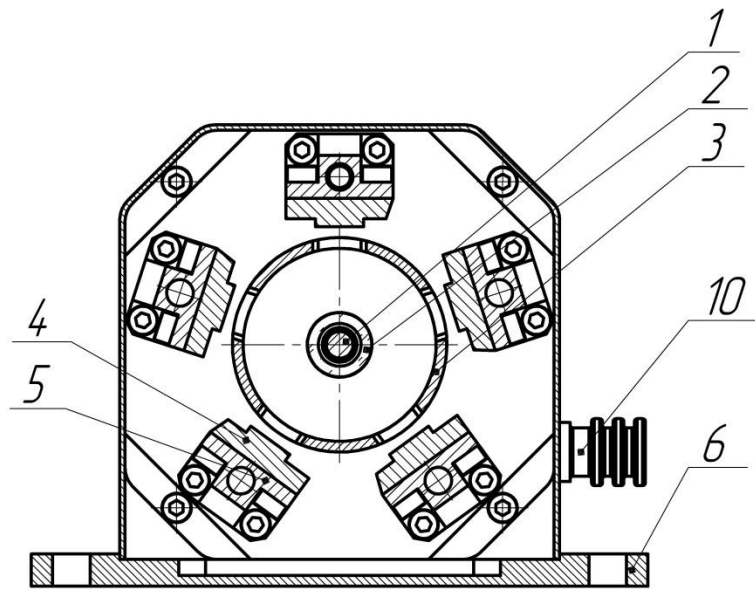


Рис. 4 Поперечный разрез на примере разработанного квантрона с диодной накачкой и диаметром активного элемента 5 мм.

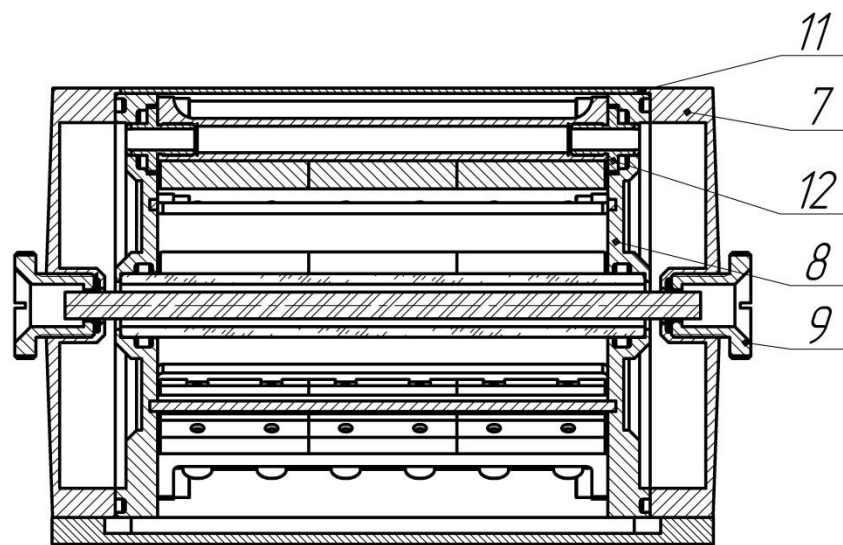


Рис. 5 Продольный разрез на примере разработанного квантрона с диодной накачкой и диаметром активного элемента 5 мм.

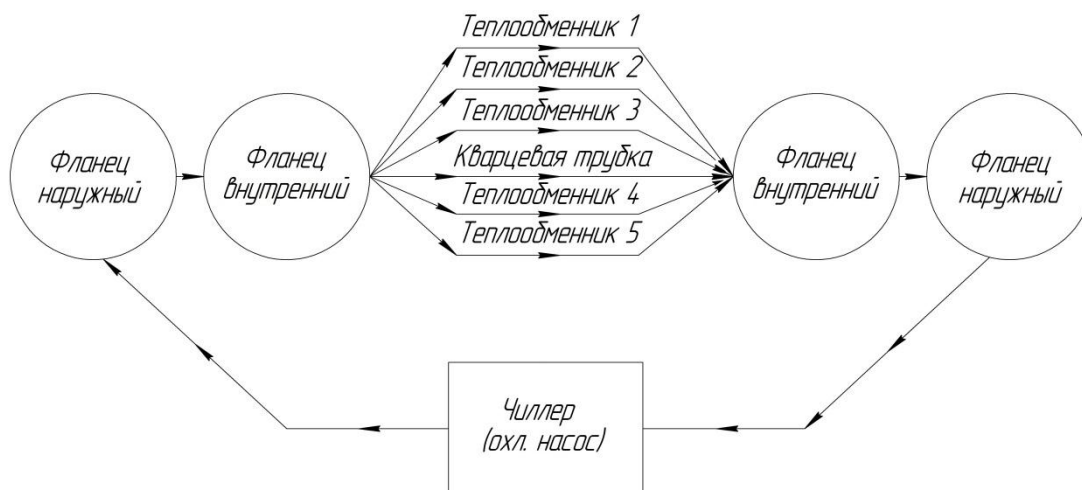
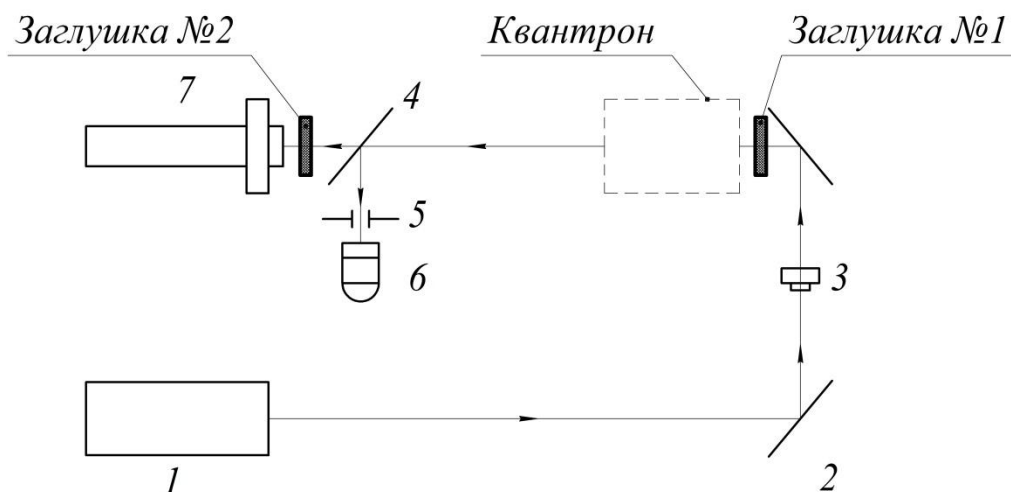


Рис. 6 Параллельная система охлаждения разработанных квантронов с диодной накачкой.



1 – непрерывный лазер; 2 – поворотное зеркало; 3 – набор ослабляющих фильтров; 4 – делительное зеркало (50:50); 5 – диафрагма; 6 – фотодиод; 7 – КМОП камера.

Рис. 7 Схема экспериментального испытательного стенда.

В главе 3.2 говорится о разрабатываемых испытательных стендах (рис. 7) для анализа входных и выходных характеристик квантронов с поперечной импульсной диодной накачкой.

В четвертой главе представлены экспериментальные данные по измерению входных и выходных энергетических и оптических характеристик квантронов.

В главе 4.1 представлены экспериментальные результаты по измерению выходной энергии диодных матриц, а также их фотографии распределения люминесценции для квантронов с диаметрами АЭ 5 и 10 мм.

В главе 4.2 содержатся результаты исследования влияния выходного зеркала резонатора и температур охлаждения на выходную энергию диодного лазера на основе разработанного квантрона при свободной генерации, а также произведена сравнительная оценка с расчетной запасенной энергией.

В главе 4.3 приведены экспериментальные данные влияния тока накачки на получение коэффициента усиления (рис. 8, рис. 9, рис. 10) и распределение люминесценции по сечению активного элемента (рис. 11 и рис. 12) квантронов с диаметрами активных элементов 5 и 10 мм в зависимости от температуры охлаждения.

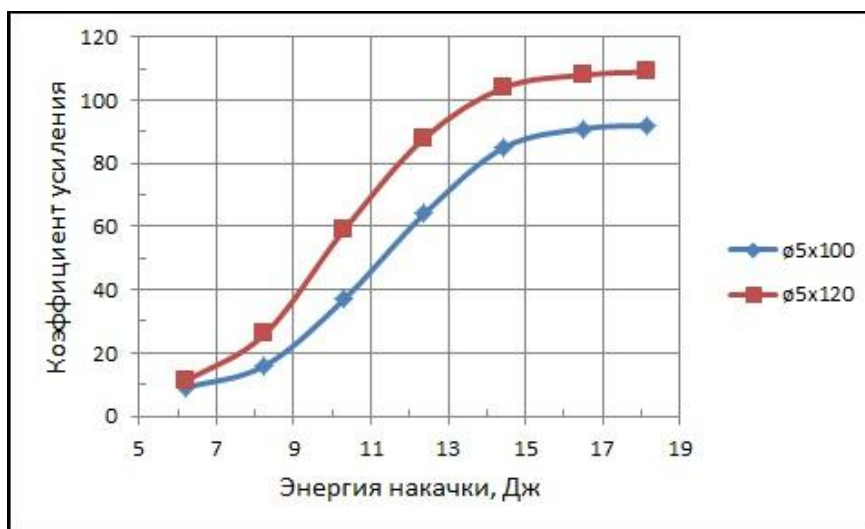


Рис. 8 Зависимость коэффициента усиления от энергии накачки при одинаковой зоне накачки и разных длинах активных элементов (Nd:YAG, концентрация неодима 1%) с диаметром 5 мм при температуре охлаждения 25°C.

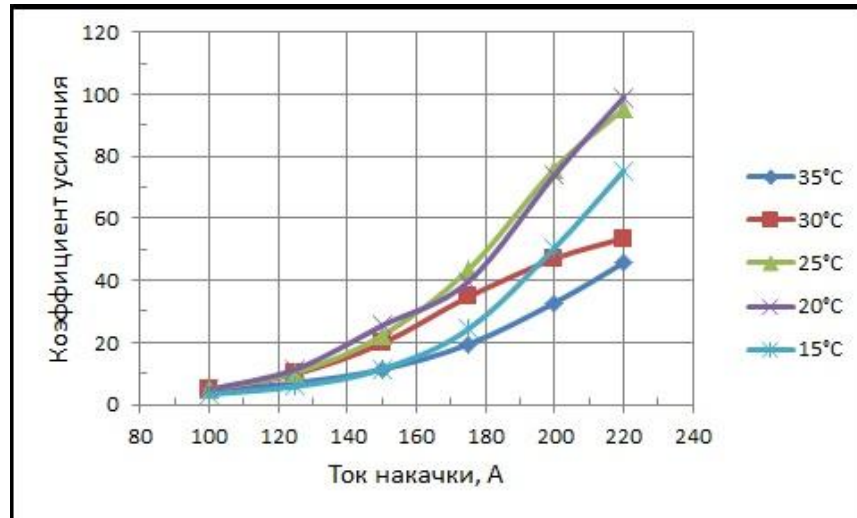


Рис. 9 Зависимость коэффициента усиления от тока накачки квантрона с максимальной световой мощностью 37 кВт при разных температурах охлаждения с размером активного элемента (Nd:YAG, концентрация неодима 0,6%) Ø10x160 мм и размером зоны накачки 140 мм.

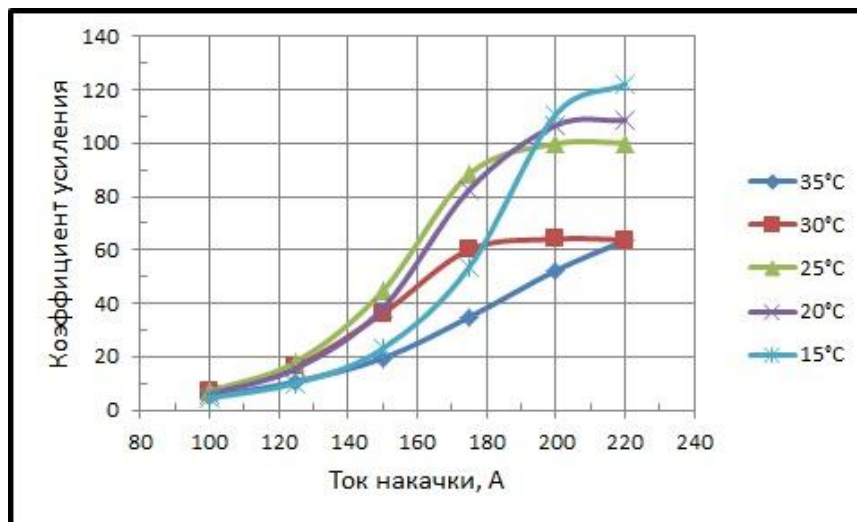


Рис. 10 Зависимость коэффициента усиления от тока накачки квантрона с максимальной световой мощностью 46 кВт при разных температурах охлаждения с размером активного элемента (Nd:YAG, концентрация неодима 0,6%) Ø10x160 мм и размером зоны накачки 140 мм.



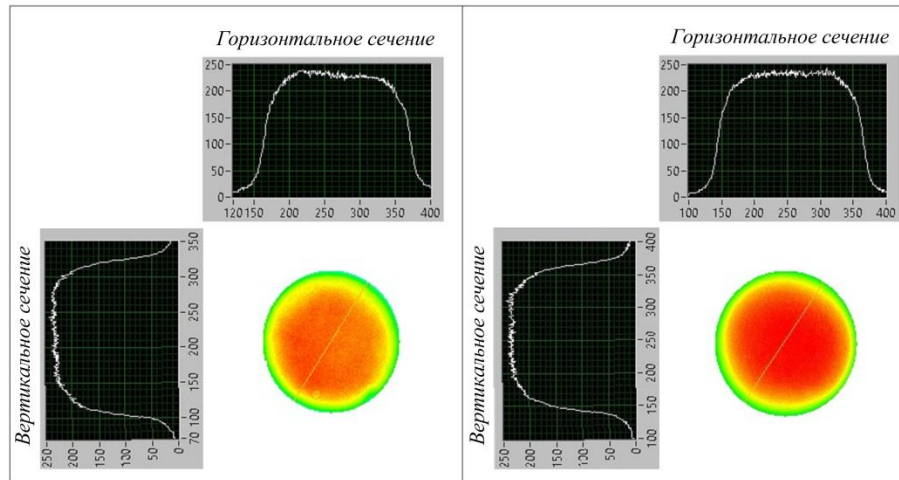


Рис. 11 Распределение люминесценции по сечению активного элемента квантрона с размерами активных элементов  $\text{Ø}5 \times 100$  (слева) и  $\text{Ø}5 \times 120$  (справа) при температуре охлаждения  $25^\circ\text{C}$  и энергии накачки 14 Дж.

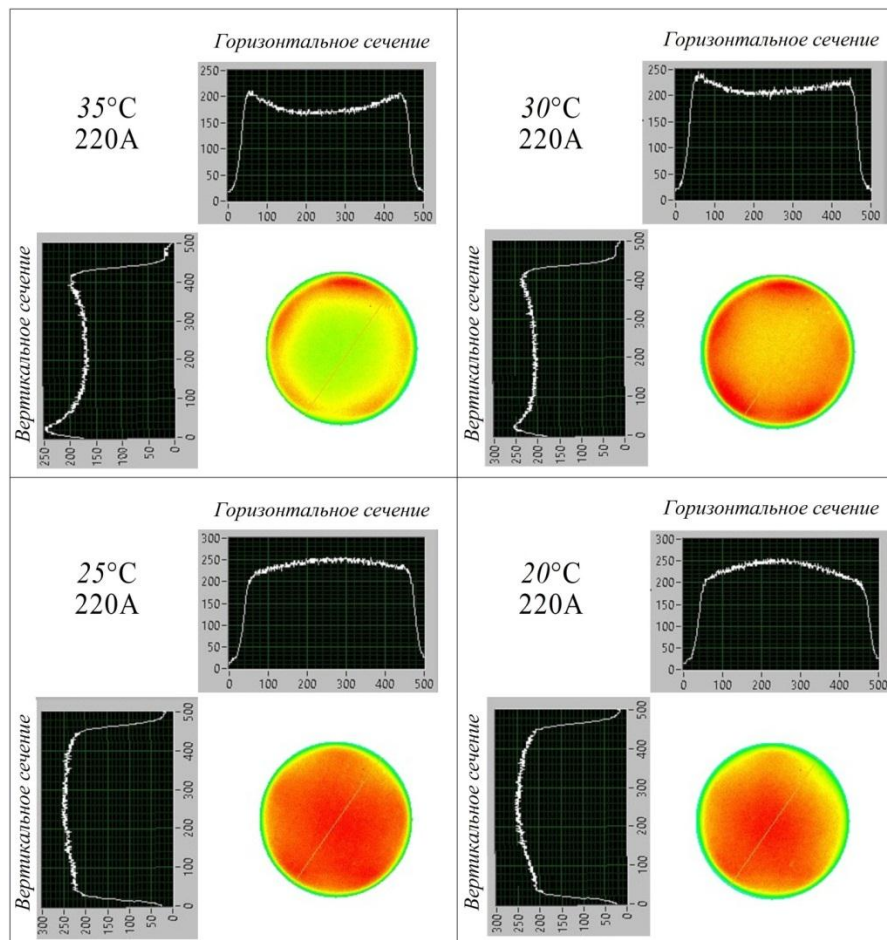


Рис. 12 Распределение люминесценции по сечению активного элемента размером  $\text{Ø}10 \times 160$  при разных температурах охлаждения на примере квантрона с максимальной световой мощностью 37 кВт.

**В заключении** обсуждаются основные результаты работы:

1. Разработана математическая модель, запатентован и изготовлен опытный образец квантрона с импульсной поперечной диодной накачкой и диаметром активного элемента 5 мм (Nd:YAG) с запасенной энергией более 1,5 Дж.
2. Разработана математическая модель, запатентован и изготовлен опытный образец квантрона с импульсной поперечной диодной накачкой и диаметром активного элемента 10 мм (Nd:YAG) с запасенной энергией более 2 Дж.
3. Разработаны испытательные стенды и методики измерений выходной энергии диодных матриц, а также временного профиля коэффициента усиления и распределения люминесценции по сечению активного элемента.
4. В результате исследования влияния параметров накачки и геометрии активного элемента на выходные оптические и энергетические параметры найдены оптимальные зоны коэффициентов усиления квантронов. Причем, изменения геометрических параметров активного элемента и зоны накачки при одинаковых энерговкладах ведут к увеличению погонного коэффициента усиления в несколько раз.
5. Достигнутая в экспериментах минимально возможная неоднородность распределения люминесценции по сечению активного элемента - менее 5 %.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Овчаренко Б.Д., Багдасаров В.Х., Букин В.В., Кудашева Н.А., Сироткин А.А., Цветков В.Б., Гарнов С.В. Особенности разработок по созданию твердотельных лазеров с диодной накачкой (квантроны) // X всероссийская школа студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, Сборник тезисов, Саров, – 2017.
2. Овчаренко Б.Д., Багдасаров В.Х., Букин В.В., Кудашева Н.А., Долматов Т.В., Цветков В.Б., Гарнов С.В. Определение параметров модуля диодной накачки // XI всероссийская школа студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, Сборник тезисов, Саров, – 2018.

### **Список цитируемой литературы**

1. Кравцов Н.В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой. – Изд-во МГУ, Квантовая электроника, 31, №8, 661-677с., 2001.
2. Глухих И.В., Димаков С.А., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Фролов С.В. Мощные твердотельные лазеры на Nd:YAG с поперечной диодной накачкой и улучшенным качеством излучения // ЖТФ. 2011. Т.81. №8
3. Гречин С.Г., Николаев П.П. Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. №1.
4. Гречин С.Г., Николаев П.П., Шарандин Е.А. Функциональные возможности квантронов твердотельных лазеров с поперечной накачкой. – Изд-во МГТУ им. Баумана, 26 с., 2014.
5. R. Diehl (E.D.). High-power diode lasers. Fundamentals, technology, applications (Freiburg: Springer, 420, 2000).